

MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

ODRŽIVI RAZVOJ

VINKO GROKŠA

KONSTRUKCIJSKO RJEŠENJE VJETROTURBINE

ZAVRŠNI RAD

ČAKOVEC, 2018.

MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

ODRŽIVI RAZVOJ

VINKO GROKŠA

KONSTRUKCIJSKO RJEŠENJE VJETROTURBINE

CONSTRUCTION SOLUTION OF WIND TURBINE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

dr. sc. Stanislav Sviderek, pred.

ČAKOVEC, 2018.

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Stanislavu Svidereku na pomoći, susretljivosti te stručnim savjetima koji su mi puno pomogli pri izradi završnog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i potpori tijekom pisanja ovog rada i na podršci tijekom studiranja.

Također, zahvaljujem svim profesorima koji su me poučavali tijekom trogodišnjeg studija.

Vinko Grokša

SAŽETAK

Vjetar nastaje kao posljedica sunčevog zračenja. Gibanje zraka javlja se zbog neravnomjernog zagrijavanja Zemljine površine te zbog toga dolazi do promjena tlaka zraka što izaziva pojavu koju nazivamo vjetar.

U teorijskom dijelu govori se o nastanku vjetra kao prirodne pojave, njegovu gibanju i snazi. Opisane su osnovne pretvorbe energije u vjetroturbini i izvedene formule za proračun snage.

Opisani su konstrukcijski oblici vjetrogeneratora i njegovi dijelovi, podjela vjetroturbina prema djelovanju sila, položaju vratila i broju lopatica. Opisat će se vrste vjetroelektrana i podjela prema instaliranoj snazi te prema položaju.

U današnje vrijeme postoji mnogo koncepata vjetroturbina. S razvojem tehnologije, otkrivanjem novih materijala i njihovih svojstava te boljim razumjevanjem fizikalnih zakona unaprijeđuju se trenutni koncepti vjetroturbina. No, isto tako, istražuju se i nove mogućnosti za iskorištavanje snage vjetra koje bi mogle zaživjeti u skoroj budućnosti.

Na poslijetku, razrađen je primjer proračuna površine rotora, kutne brzine, promjer lopatica te broj okretaja vjetroturbine za zadane ulazne parametre na zadanoj lokaciji.

Ključne riječi: vjetroturbina, vjetar, snaga, tlak, vjetroelektrana, proračun.

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	8
2. NASTANAK I SNAGA VJETRA	9
2.1 Ruža vjetrova	11
2.2 Snaga vjetra	11
3. OSNOVNE PRETVORBE ENERGIJE U VJETROTURBINI.....	13
3.1 Faktor indukcije	13
3.2 Betzov zakon	14
4. KONSTRUKCIJSKI OBLICI VJETROTURBINA	16
4.1 Konstrukcijski oblici vjetroturbine prema djelovanju sila	16
4.1.1 Vjetroturbine na principu sile uzgona.....	16
4.1.2 Vjetroturbine na principu sile otpora	18
4.2 Konstrukcijski oblici vjetroturbine prema položaju vratila	19
4.2.1 Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje	19
4.2.2 Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje	21
4.2.2.1 Darrieusova vjetroturbina.....	22
4.2.2.1.1 H-tip vjetroturbine.....	23
4.2.2.1.2 Tip sa spiralnim lopaticama	24
4.2.2.1.3 Horizontalni tip Darrieusove vjetroturbine	25
4.2.2.2 Savoniusova vjetroturbina.....	26
4.3 Konstrukcijski oblici vjetroturbine prema broju lopatica	27
4.3.1 Vjetroturbina s jednom lopaticom	27
4.3.2 Vjetroturbina s dvije lopatice.....	27
4.3.3 Vjetroturbina s više lopatica	28

5. OSNOVNI DJELOVI VJETROELEKTRANE	29
5.1 Rotor vjetroturbine	31
5.2 Vratilo s prijenosnikom.....	31
5.2.1 Sporohodno vratilo.....	31
5.2.2 Brzohodno vratilo	31
5.2.3 Prijenosnik (multiplikator).....	32
5.3 Električni generator	32
5.4 Regulacijski sustavi.....	32
5.4.1 Sustav za zakretanje kućišta.....	32
5.4.2 Sustav za aerodinamičku regulaciju brzine vrtnje	33
5.4.3 Sustav mehaničkog kočenja.....	33
5.4.4 Nadzorno – upravljački I komunikacijski sustav.....	33
5.5 Stup	34
5.6 Temelj	34
6. VRSTE VJETROELEKTRANA	35
6.1 Vrste vjetroelektrana prema instaliranoj snazi	35
6.1.1 Male vjetroelektrane	35
6.1.2 Velike vjetroelektrane	36
6.2 Vrste vjetroelektrana s obzirom na položaj	37
6.2.1 Kopnene vjetroelektrane	37
6.2.2 Priobalne vjetroelektrane	38
6.2.3 Plutajuće vjetroelektrane.....	39
6.2.4 Zračne vjetroelektrane	40
7. NUMERIČKI PRIMJER PRORAČUNA ROTORA	41

8. PREDNOSTI I NEDOSTATCI VJETROELEKTRANA	46
8.1 Prednosti vjetroelektrana	46
8.2 Nedostatci vjetroelektrana	46
9. ZAKLJUČAK	47
10. LITERATURA	48
Prilozi.....	50
Popis slika.....	50
Popis grafova.....	51
Popis oznaka	52

1. UVOD

U današnje vrijeme zbog velike potrošnje fosilnih goriva, kao i negativnih posljedica na klimu, sve više počinje razvoj i primjena novih, čistih, obnovljivih izvora energije.

U prirodi smo okruženi raznim oblicima obnovljivih izvora energije kao što su energija vjetra, energija sunca, geotermalna energija, biomasa, energija valova. U ovom završnom radu naglasak će biti na energiji vjetra.

Počeci korištenja energije vjetra sežu još u daleku prošlost. Energija vjetra prvotno se koristila za pokretanje jedrenjaka, a kasnije se njihova upotreba proširila na dobivanje mehaničke energije za pokretanje mlinova i crpki za vodu.

Korištenje potencijala vjetra za dobivanje električne energije značajnije se počinje razvijati tek u 20. stoljeću, nakon, takozvane, prve energetske krize u Danskoj i SAD-u. Kasnije su im se pridružile još neke zapadnoeuropske zemlje koje započinju izgradnju vjetroparkova i razvijaju industriju za proizvodnju opreme. Danas u svijetu postoji oko šezdeset proizvođača opreme za vjetrogeneratore i svaka zemlja svijeta može se pohvaliti s barem jednom vjetroelektranom (komercijalnom ili ispitnom).

Postoje različiti tipovi vjetrogeneratorsa koji se odabiru ovisno o različitim čimbenicima poput brzine vjetra, potrebne instalirane snage, lokacije i slično. Vrste i konstrukcijska obilježja te njihove prednosti i nedostaci bit će obrađeni u ovom radu. Izvedene su i objašnjene najbitnije formule za proračun snage vjetra. U zadnjem dijelu rada napravljen je jednostavan primjer proračuna površine rotora, kutne brzine, promjera lopatica te broja okretaja vjetroturbine.

2. NASTANAK I SNAGA VJETRA

Vjetar nastaje kao posljedica sunčevog zračenja. Pretpostavlja se kako na stvaranje vjetra otpada tek 1-2% od ukupnog sunčevog zračenja koje dođe na površinu Zemlje u 1 satu [1]. Do gibanja zraka dolazi, prvenstveno, zbog neravnomjernog zagrijavanja Zemljine površine.

Ekvator i njegov pojas apsorbiraju znatno više energije nego polovi, kopno se grije i hladi brže od mora te dolazi do stvaranja razlike tlaka zraka koja se pretvara u kinetički oblik energije kojeg nazivamo vjetar.

Ovaj proces neprestano se ponavlja i ovisi o klimatskim uvjetima na Zemlji. Osim o globalnom strujanju zraka od ekvatora prema polovima, nastanak vjetra ovisi i o godišnjim dobima te baričkim sustavima, poznatijima kao ciklona i anticiklona, koji se kreću od zapada prema istoku.

Jačina vjetra iskazuje se Beaufortovom ljestvicom. Brzina vjetra mjeri se uređajem koji se naziva anemometar, dok za određivanje smjera vjetra služi vjetrulja. Ova dva uređaja računalno se povezuju, a računalo bilježi podatke i obrađuje rezultate [1].

Beaufortova oznaka, Bf	Opis vjetra	Djelovanje	Brzina na 10 m iznad tla		
			m/s	km/h	čv
0	Tišina	Dim se diže ravnu u vis, zastave i lišće s ne miču	0,0 - 0,4	0,0 - 1,4	0,0 - 0,9
1	Lahor	Čovjek ne osjeća, ali dim se više ne diže jednoliko, vjetrulja se ne pokreće	0,4 - 1,8	1,4 - 6,5	0,9 - 3,5
2	Povjetarac	Osjeća se na licu, lišće počinje treperiti i vjetrulja se pokreće	1,8 - 3,6	6,5 - 13	3,5 - 7
3	Slab vjetar	Lišće se neprestano njiše i šušti, lagana zastava se njiše	3,6 - 5,8	13 - 20,9	7 - 11
4	Umjereni vjetar	S tla se podiže prašina, suho lišće i papirići, zastava se razvija, njišu se manje grane	5,8 - 8,5	20,9 - 30,6	11 - 17
5	Umjereno jaki vjetar	Njišu se veće lisnate grane, a i mala stabla, ljudima je neugodno, stvaraju se mali valovi	8,5 - 11	30,6 - 39,6	17 - 22
6	Jaki vjetar	Zuji na predmetima, žice zvižde, njišu se velike grane, teško je nositi kišobran	11 - 14	39,6 - 50,4	22 - 28
7	Žestoki vjetar	Neprestano se njiše drveće, valovi se pjene, otežano je hodanje	14 - 17	50,4 - 61,2	28 - 34
8	Olujni vjetar	Njišu se debela drveća, lome se velike grane, onemogućeno je hodanje	17 - 21	61,2 - 75,6	34 - 41
9	Jaki olujni vjetar	Pomiču se manji predmeti, pomiču se cijepovi, nastaju štete na kućama	21 - 25	75,6 - 90	41 - 48
10	Orkanski vjetar	Obara se i čupa drveće sa korijenjem, nastaju veće štete na zgradama	25 - 29	90 - 104,4	48 - 56
11	Jaki orkanski vjetar	Velike štete na većem području, razorno djelovanje	29 - 34	104,4 - 122,4	56 - 65
12	Orkan	Teško pustošenje cijelog područja	43	154,8	65

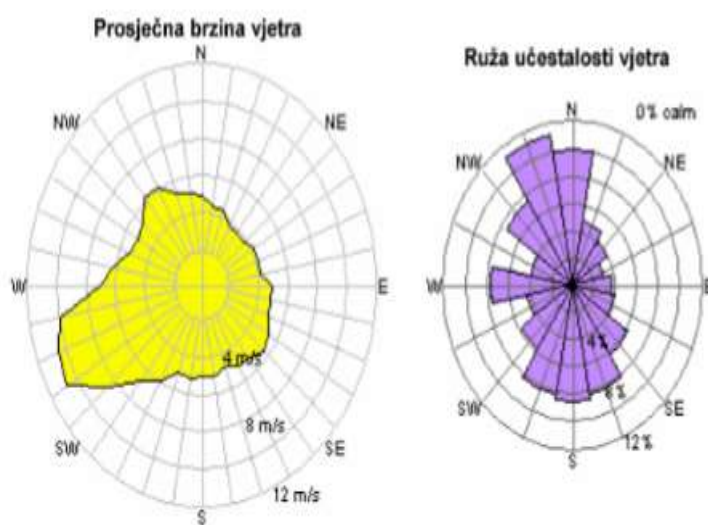
Slika 1. Beaufortova ljestvica jačine vjetra

Izvor: Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD

2.1 Ruža vjetrova

Ruža vjetrova izrađuje se na osnovi meteoroloških promatranja brzina i smjerova vjetra. Ona opisuje brzine vjetra iz dvanaest različitih smjerova, a svaki obuhvaća 30° horizonta.

Kako bi karta vjetrova bila što preciznija za danu lokaciju, mjerenja se obavljaju i do nekoliko godina [2].



Slika 2. Ruža vjetrova

Izvor: Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD

2.2 Snaga vjetra

Specifična snaga vjetra P_{vj} proporcionalna je trećoj potenciji njegove brzine, a za konstantnu brzinu i površinu okomitu na smjer strujanja iznosi [1]:

$$P_{vj} = \frac{\rho v^3}{2}$$

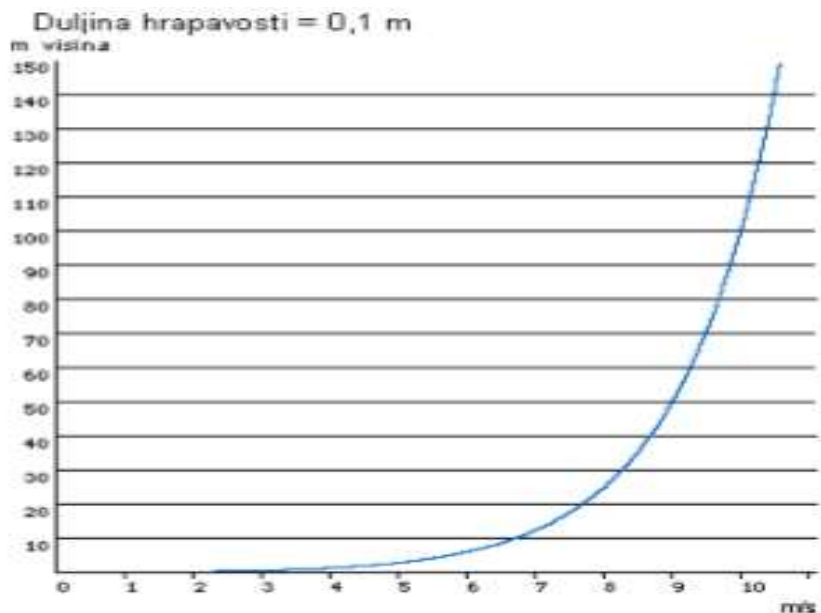
Potrebno je reći kako se prosječna godišnja snaga ne može računati s prosječnom godišnjom brzinom vjetra jer će rezultat značajno podcijeniti stvarnu prosječnu snagu vjetra [1].

Budući da brzina vjetra nije konstantna, formula za prosječnu specifičnu snagu glasi:

$$P_{vj} = \frac{1}{2T} \int_0^T \rho v^3(t) dt$$

Odabir lokacije za vjetroenergetsko postrojenje ovisi o raznim čimbenicima kao što su gustoća zraka, površina tla, perzistencija vjetra i slično. Najveće brzine vjetra postižu se na vrhovima brda, izloženim obalama mora te na otvorenom moru. Brzina vjetra ovisi i o visini. Na samoj površini Zemlje brzina vjetra gotovo je jednaka nuli.

Hrapavost je, također, bitan faktor koji utječe na brzinu vjetra. Što je hrapavost veća, javlja se i veći otpor strujanju fluida, a to za posljedicu ima pad brzine. Najveće brzine vjetra pojavljuju se pri vrhu troposfere na oko dvanaest kilometara visine [2]. Utjecaj visine na brzinu vjetra prikazuje nam slika 3.



Slika 3. Promjena brzine vjetra s visinom

Izvor: Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD

3. OSNOVNE PRETVORBE ENERGIJE U VJETROTURBINI

Pretvaranje kinetičke energije vjetra u kinetičku energiju vrtnje vratila odvija se preko lopatica vjetroturbine. Rotor vjetroturbine i električni generator nalaze se na istom vratilu. Svrha električnog generatora je da pretvara kinetičku energiju vjetra u električnu energiju.

Prema [3], raspoloživa snaga vjetra P_{rasp} dobiva se pomoću sljedeće formule:

$$P_{rasp} = (\rho * v_0 * A) * \left(\frac{1}{2} * v_0^2\right) = \frac{1}{2} * \rho * A * v_0^3$$

Zakon o očuvanju mase govori nam da je maseni protok zraka ispred rotora turbine jednak masenom protoku zraka iza rotora, što znači:

$$\dot{m} = \rho * u * A = \rho * u_1 * A_1$$

Jednadžba za aksijalnu brzinu u ravnini rotora glasi:

$$u = \frac{1}{2} * (v_0 + u_1)$$

Kombiniranjem ovih triju jednadžbi, dobije se snaga vjetroturbine P :

$$P = \frac{1}{2} * \dot{m} * (v_0^2 - u_1^2) = \frac{1}{2} * \rho * u * A * (v_0^2 - u_1^2)$$

3.1 Faktor indukcije

Faktor indukcije a definiran je kao:

$$a = \frac{v_0 - u}{v_0} \rightarrow u = (1 - a) * v_0$$

Kombiniranjem jednadžbe za aksijalnu brzinu u ravnini rotora i faktora indukcije dobivamo:

$$u_1 = (1 - 2a) * v_0$$

Preko ovog izraza može se dobiti nova jednadžba za snagu:

$$P = 2 * \rho * v_0^3 * a * (1 - a)^2 * A$$

3.2 Betzov zakon

Veći dio kinetičke energije vjetra je neiskoristiv iz razloga što vjetar mora nastaviti strujanje. O tome govori i Betzov zakon koji se može izraziti matematički preko formule za koeficijent snage.

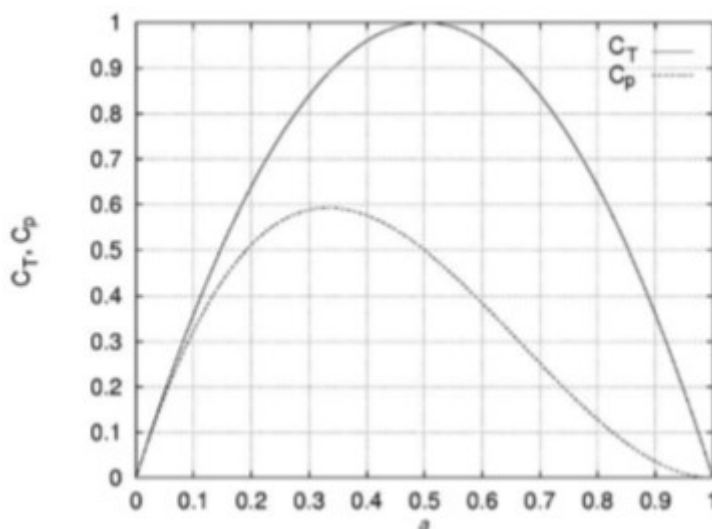
Koeficijent snage definiran je kao omjer snage na vratilu vjetroturbine i raspoložive snage u slobodnoj struji vjetra, a često ga se još naziva i stupanj aerodinamičke pretvorbe [3].

$$c_p = \frac{P}{P_{vj}} = \frac{P}{\frac{1}{2} * \rho v_0^3 * A}$$

Najveća teoretska vrijednost ovog izraza naziva se Betzovom granicom i iznosi $c_{p,max}=0,593$.

Ova vrijednost je najveća kada faktor indukcije a iznosi $a = \frac{1}{3}$.

U tom slučaju, brzina u brazdi iznosi $u_1 = \frac{1}{3} v_0$.



Slika 4. Betzov limit

Izvor: Martin O., Hansen L. (2008). Aerodynamics of wind turbines

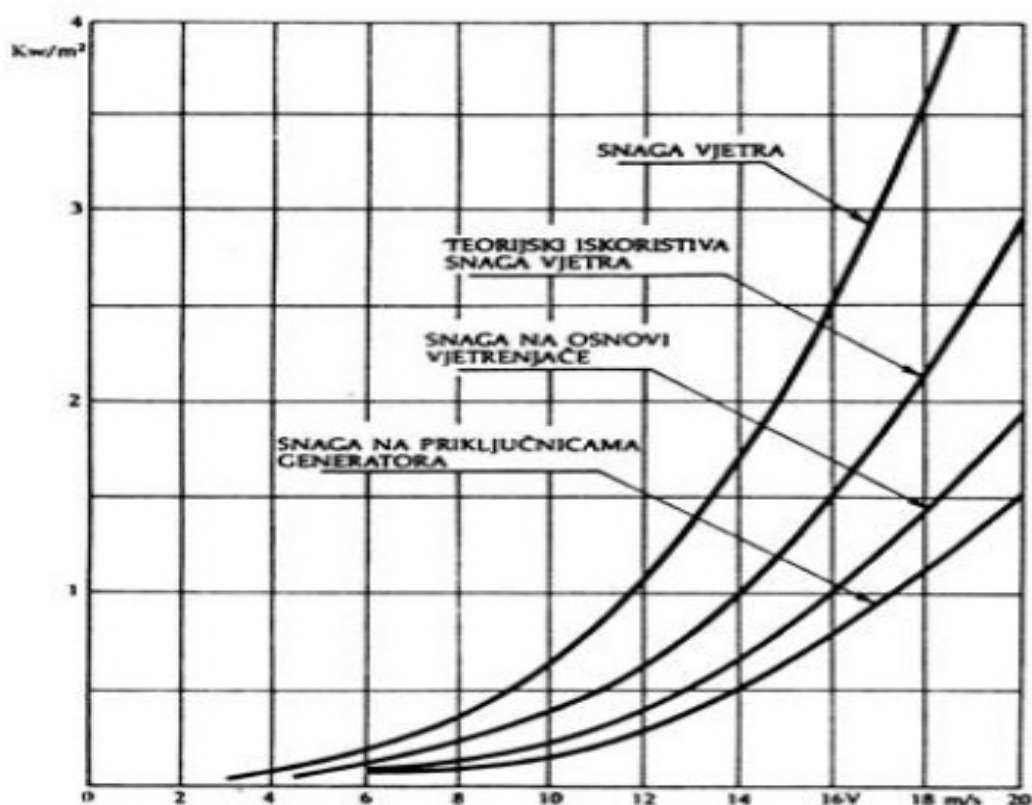
Realni koeficijent snage uvijek je manji od Betzovog limita zbog hidrauličkih gubitaka, a u sebi sadrži stupanj iskoristivosti rotora.

Uzme li se u obzir maksimalni stupanj djelovanja zračne turbine od 0,65 te stupanj djelovanja generatora 0,8, tada maksimalna energija vjetrogeneratora iznosi [4]:

$$W = 16/27 * 0,65 * 0,8 * 0,625 * A * v_0^3$$

$$W = 0,193 * A * v_0^3$$

Dakle, u teoriji, iskorištava se samo 19% kinetičke energije vjetra za proizvodnju električne energije u vjetroelektranama [4]. Slika 5. prikazuje ovisnost snage vjetra o brzini vjetra.



Slika 5. Ovisnost snage vjetra o brzini vjetra

Izvor: Šljivac D. (2008). „OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE: Energija vjetra“

4. KONSTRUKCIJSKI OBLICI VJETROTURBINA

Vjetroagregati su hladni rotacijski strojevi čija je primarna svrha pretvaranje kinetičke energije vjetra, prvo u mehaničku energiju, a potom mehaničke energije u električnu energiju pomoću električnog generatora.

Konstruktivski oblici vjetroturbina mogu se podijeliti prema:

- djelovanju sile
- položaju vratila
- broju lopatica

4.1 Konstrukcijski oblici vjetroturbine prema djelovanju sile

Prema djelovanju sile, postoje dvije izvedbe vjetroturbina:

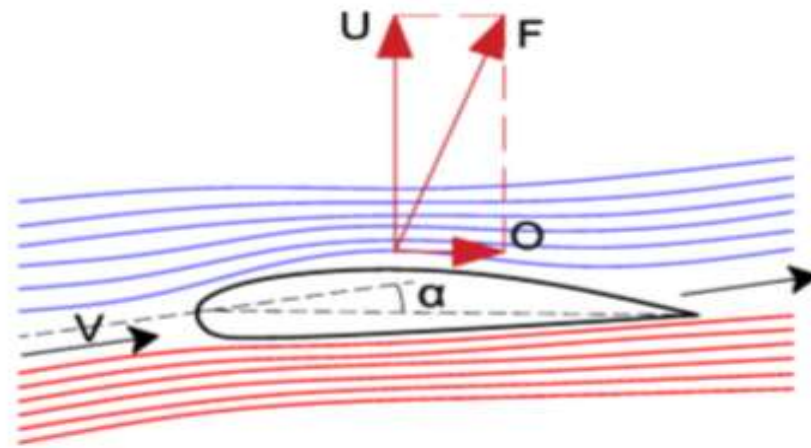
- vjetroturbine na principu sile uzgona
- vjetroturbine na principu sile otpora

4.1.1 Vjetroturbine na principu sile uzgona

Vjetroturbine na principu sile uzgona koriste silu uzgona kao pogonsku silu. U ovim slučajevima, sila uzgona je višestruko veća od sile otpora. Prema definiciji, sila uzgona je okomita na smjer vjetra koji presijecaju lopatice rotora te se preko kraka izvršava željeni okretni moment. Svi uređaji s horizontalnom osi vrtnje pogonjeni su na ovaj način.

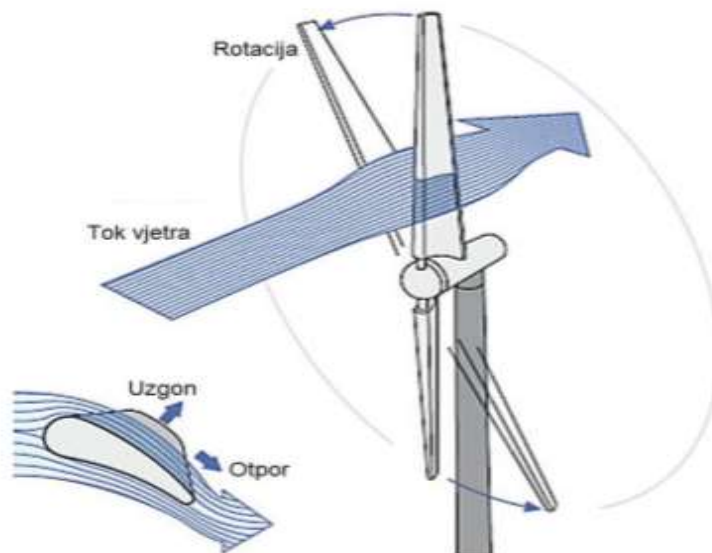
Kod djelovanja sile uzgona na lopatice rotora, njihova linearna brzina je nekoliko puta veća u odnosu na brzinu vjetra. Brzine vrtnje pri tome su velike, dok je moment na vratilu rotora mali.

Moderne vjetroturbine s dobrim aerodinamičkim profilom lopatica postižu maksimalne koeficijente snage od $c_p = 0.5$ te se time približavaju graničnoj vrijednosti od $c_{pmax} = 0.59$, izračunatoj prema Betz-u.



Slika 6. Primjena sile uzgona kao pogonske sile

Izvor: Mađar E. (2015.) ZAVRŠNI RAD

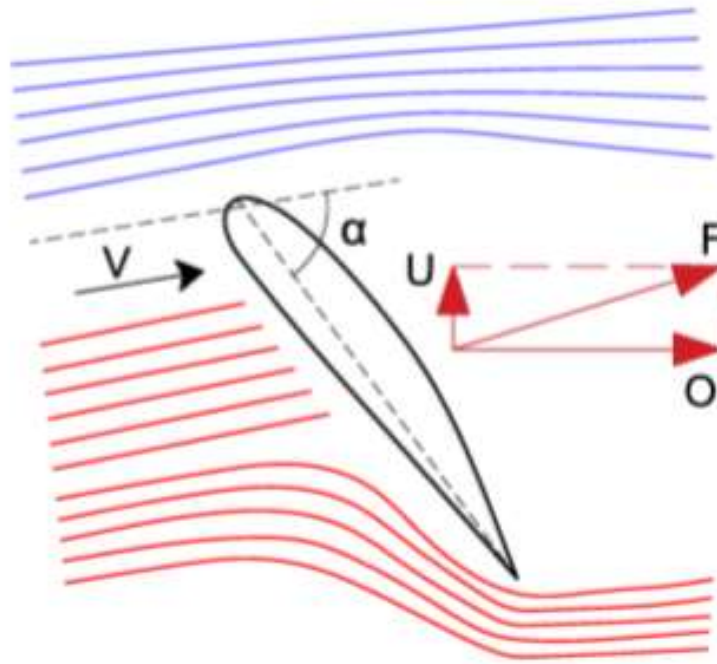


Slika 7. Dobivanje rotacijskog gibanja na principu sile uzgona

Izvor: Mađar E. (2015.) ZAVRŠNI RAD

4.1.2 Vjetroturbine na principu sile otpora

Sila otpora kod vjetroturbina definira se kao sila koja djeluje na površinu okomitu na smjer strujanja vjetra. Ona je proporcionalna površini A na koju djeluje, gustoći zraka ρ te kvadratu brzine vjetra v . Princip sile otpora najčešće koriste vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje.



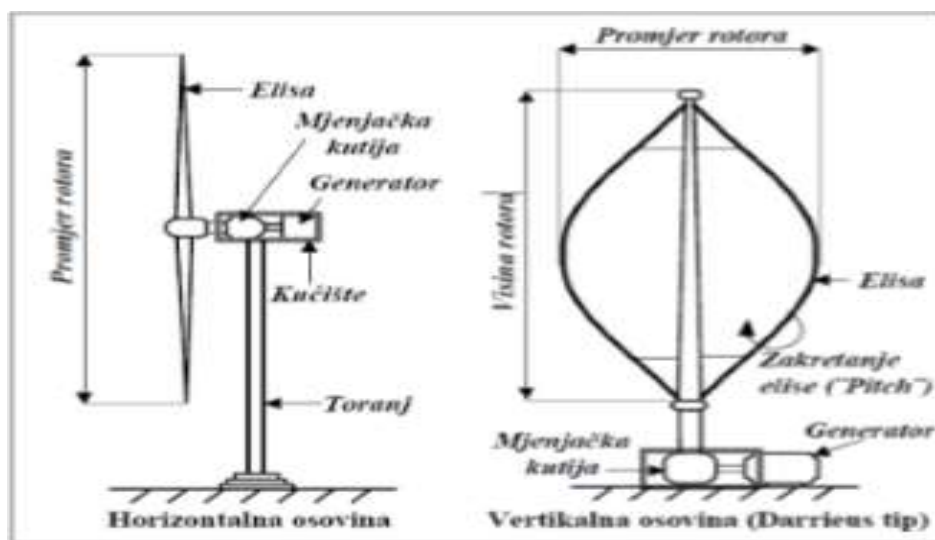
Slika 8. *Primjena sile otpora kao pogonske sile*

Izvor: Mađar E. (2015.) ZAVRŠNI RAD

4.2 Konstrukcijski oblici vjetroturbine prema položaju vratila

Vjetroturbine se s obzirom na položaj vratila dijele u dvije skupine:

- vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje
- vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje



Slika 9. Konstrukcijska rješenja vjetroturbina s obzirom na položaj vratila

Izvor: Županić D. (2015). DIPLOMSKI RAD

4.2.1 Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje

Kod ove vrste vjetroturbina rotor je postavljen na vrhu stupa. Lopatice su usmjerene u smjeru strujanja vjetra. Električni se generator postavlja, najčešće, u trup vjetroturbine zajedno s multiplikatorom. Postoje dvije konstrukcijske izvedbe ovog tipa vjetroturbina.

Prva izvedba je sa stupom iza lopatica, dok je druga izvedba sa stupom ispred njih. Izvedba sa stupom ispred lopatica ima prednost u tome što joj nije potreban mehanizam za zakretanje budući da se trup sam okreće prema smjeru vjetra. Jedna od prednosti jest što ovakve izvedbe mogu podnijeti jače udare vjetra bez opasnosti od savijanja lopatica i udaranja u stup.

Ova izvedba nije poželjna kod velikih turbina zbog problema koji mogu nastati unutar stupa s elektronikom ako se gornji dio zakrene više puta u istom smjeru. Glavni nedostatak jest što lopatice prolaze kroz turbulenciju koja se javlja prolaskom vjetra kroz stup te dolazi do velikih opterećenja na lopatice.



Slika 10. *Izvedba vjetroturbine s lopaticama iza stupa*

Izvor: Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD

Najčešće se primjenjuje druga izvedba sa stupom iza lopatica. Ovakva izvedba obavezno mora imati mehanizam za prilagodbu smjeru vjetra. Nedostatak ove izvedbe je u rotoru turbine koji mora biti udaljen od stupa, a to za posljedicu ima veće troškove izrade.



Slika 11. Izvedba vjetroturbine s lopaticama ispred stupa

Izvor: Županić D. (2015). DIPLOMSKI RAD

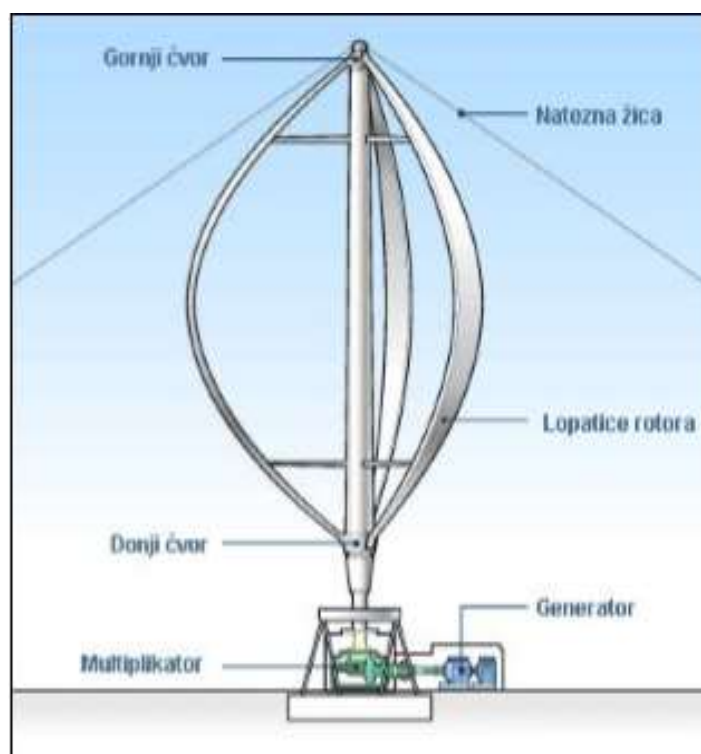
4.2.2 Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

Položaj vratila kod ove izvedbe vjetroturbine je vertikaln. Generator se nalazi u podnožju vjetroturbine čime se smanjuje opterećenje na toranj.

Glavna prednost u odnosu na horizontalne izvedbe je ta što se ove vjetroturbine ne trebaju usmjeravati u vjetar. Postoji nekoliko izvedbi ove vrste vjetroturbina i one će biti opisane u nastavku.

4.2.2.1 Darrieusova vjetroturbina

Ovaj tip vjetroturbine osmislio je i razvio francuski inženjer zrakoplovstva Georges Jean Marie Darrieus. Prva izvedba nastala je 1927. godine i po ovom tipu kasnije su se razvijale druge izvedbe. Brzina vrtnje kod ovakve izvedbe puno je veća od brzine vjetra. Lopatice su aerodinamičkog profila. Na slici 8. prikazani su osnovni dijelovi ove vjetroturbine [2].



Slika 12. Darrieusova vjetroturbina

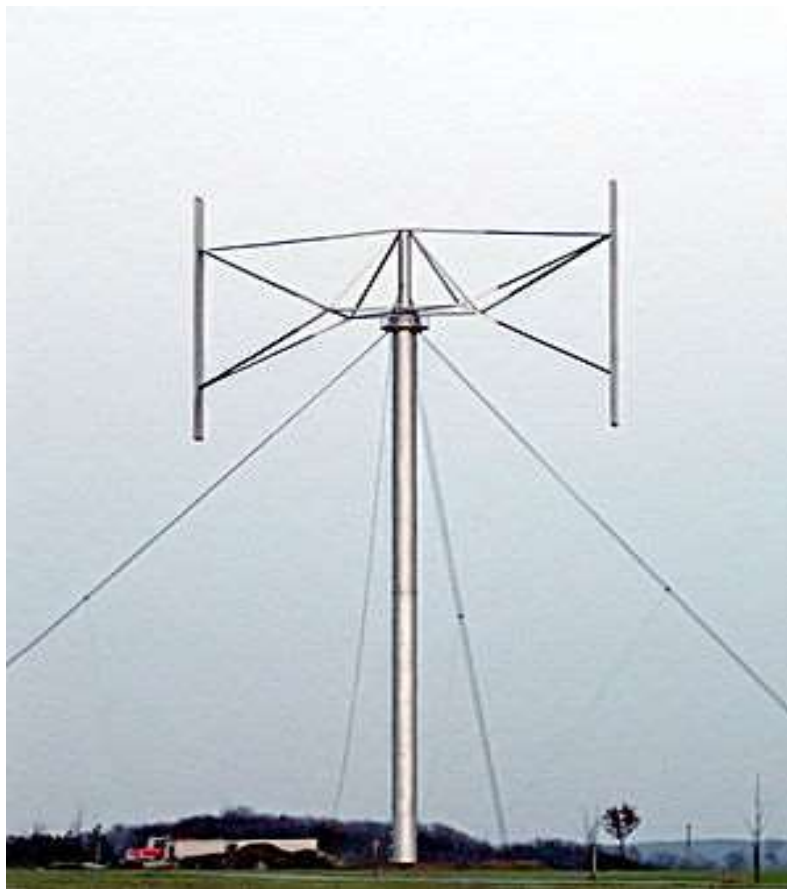
Izvor: Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD

Budući da ovakva izvedba mora postići određenu brzinu vrtnje prije nego se sama počne vrtjeti uz snagu vjetra, potrebna joj je pomoć kod pokretanja. Isto tako, kod malih brzina vrtnje, vjetroturbina ima mali okretni moment pa lako može doći do zaustavljanja zbog trenja u sustavu.

4.2.2.1.1 H-tip vjetroturbine

Kod ovog tipa vjetroturbine, lopatice su postavljene paralelno s osi vrtnje. Ovo je jednostavnija izvedba Darrieusove vjetroturbine.

Nedostatak spomenute vjetroturbine je razmak lopatica u odnosu na simetralu tornja što ima za posljedicu izradu čvršćih lopatica.



Slika 13. *H-tip vjetroturbine*

Izvor: Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD

4.2.2.1.2 Tip sa spiralnim lopaticama

Ako se lopatice postave u razmaku od 60° , tvorit će spiralu. Spiralani oblik lopatica daje dobar napadni kut vjetra na lopatice.

Ovakvi tipovi vjetroturbine smanjuju otpor rotaciji, moment je ujednačen tijekom cijelog okreta i opterećenje na ležajeve je znatno smanjeno. Spomenuti tipovi vjetroturbina nemaju problem sa samopokretanjem [2].



Slika 14. *Darrieusova spiralna vjetroturbina*

Izvor: Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD

4.2.2.1.3 Horizontalni tip Darrieusove vjetroturbine

Prednost horizontalne konstrukcije ove vjetroturbine je smanjeno aksijalno opterećenje na ležajevima budući da su ležajevi bolje smješteni u konstrukciji.

Također, otklonjen je i problem malih brzina pri tlu vjetroturbine jer su postavljene na određenu visinu. Nedostatak je nemogućnost hvatanja vjetra iz svih smjerova.



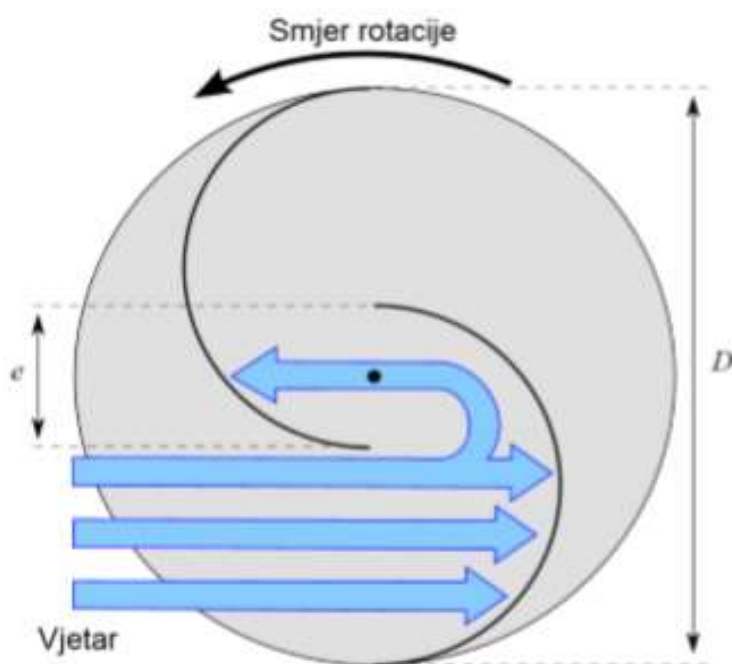
Slika 15. Horizontaln tip Darrieusove vjetroturbine

Izvor: Županić D. (2015). DIPLOMSKI RAD

4.2.2.2 Savoniusova vjetroturbina

Ovaj tip vjetroturbine osmislio je finski inženjer Siguarda J. Savonius. Izvedba vjetroturbine nastala je 1922. godine, a vjetroturbina radi na principu sile otpora.

Spomenute vjetroturbine daju puno manje energije od uzgonskih. U presjeku, turbina ima nalik slova S. Vrlo su jednostavne izvedbe.



Slika 16. *Savoniusova vjetroturbina*

Izvor: Mađar E. (2015.) ZAVRŠNI RAD

4.3 Konstrukcijski oblici vjetroturbine prema broju lopatica

Kod turbina s horizontalnom osi vrtnje, broj lopatica ima značajnu ulogu. Najčešća izvedba je ona s tri lopatice i naziva se klasični Danski koncept.

Ova izvedba pokazala se najboljim rješenjem te se prema njoj ocjenjuju ostale izvedbe. Također, neparan broj lopatica pokazao se boljim rješenjem zbog bolje uravnoteženosti konstrukcije [2].

5.2.1 Vjetroturbina s jednom lopaticom

Kod vjetroturbina s jednom lopaticom javlja se potreba za protuutegom na suprotnoj strani lopatice. Veća je i pojava buke, kao i nestabilnosti same konstrukcije. Unatoč uštedi na lopaticama, ovo rješenje nije se pokazalo učinkovitim.

5.2.2 Vjetroturbina s dvije lopatice

Zbog nedostatka jedne lopatice javlja se potreba za većom brzinom vrtnje kako bi se dobila ista količina energije kao i kod klasičnog Danskog koncepta. Posljedica toga je povećanje buke.

Osim buke, javlja se problem velikih naprezanja kod prolaska lopatice ispred stupa. Iz tog razloga ovakve izvedbe zahtijevaju složenije učvršćivanje lopatica.

5.2.3 Vjetroturbina s više lopatica

Vjetroturbina s više lopatica ne koristi se za dobivanje električne energije, već za crpljenje vode kao pogon pumpama za vodu. Imaju malu brzinu vrtnje, velik moment pokretanja, ali malu učinkovitost. Jednostavne su izvedbe. Naziva se još „američka“ vjetroturbina.



Slika 17. Vjetroturbine s jednom, dvije i više lopatica

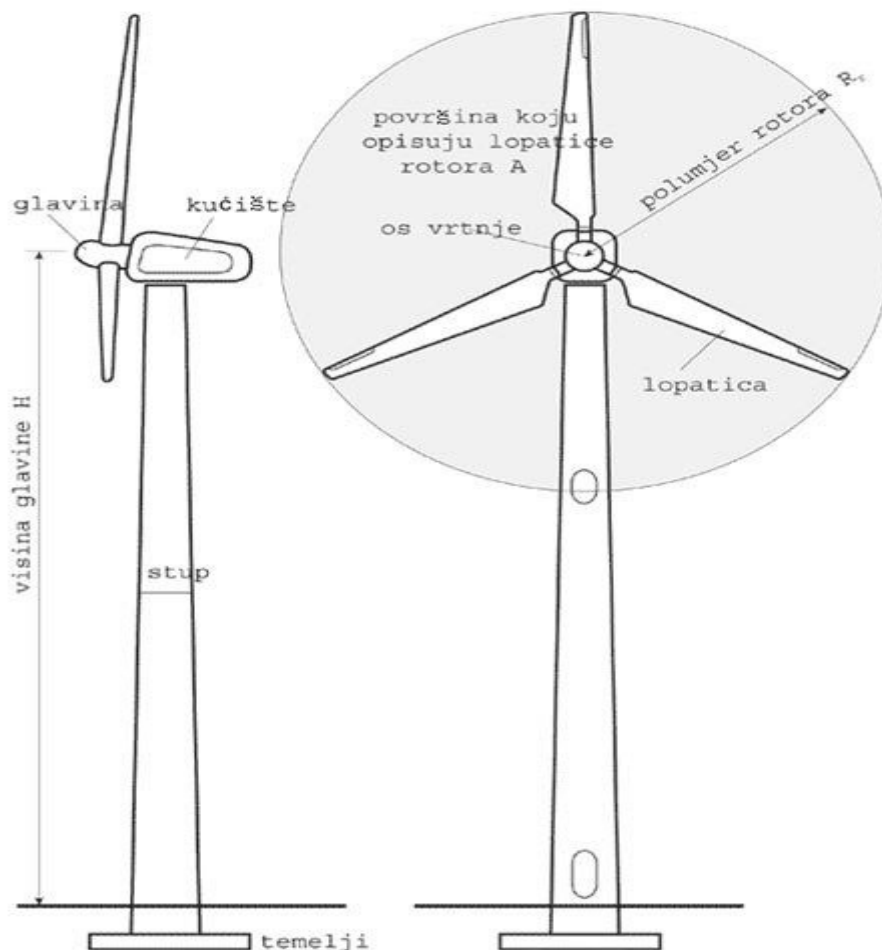
Izvor 1: Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD

Izvor 2: Županić D. (2015). DIPLOMSKI RAD

5. OSNOVNI DJELOVI VJETROELEKTRANE

Vjetroturbine s vodoravnom osi vrtnje mogu se opisati u nekoliko osnovnih značajki:

- visina glavine (H)
- površina koju opisuju lopatice rotora (A)
- punoća lopatice (σ)
- koeficijent vršne brzine (λ)
- nazivna snaga (P)

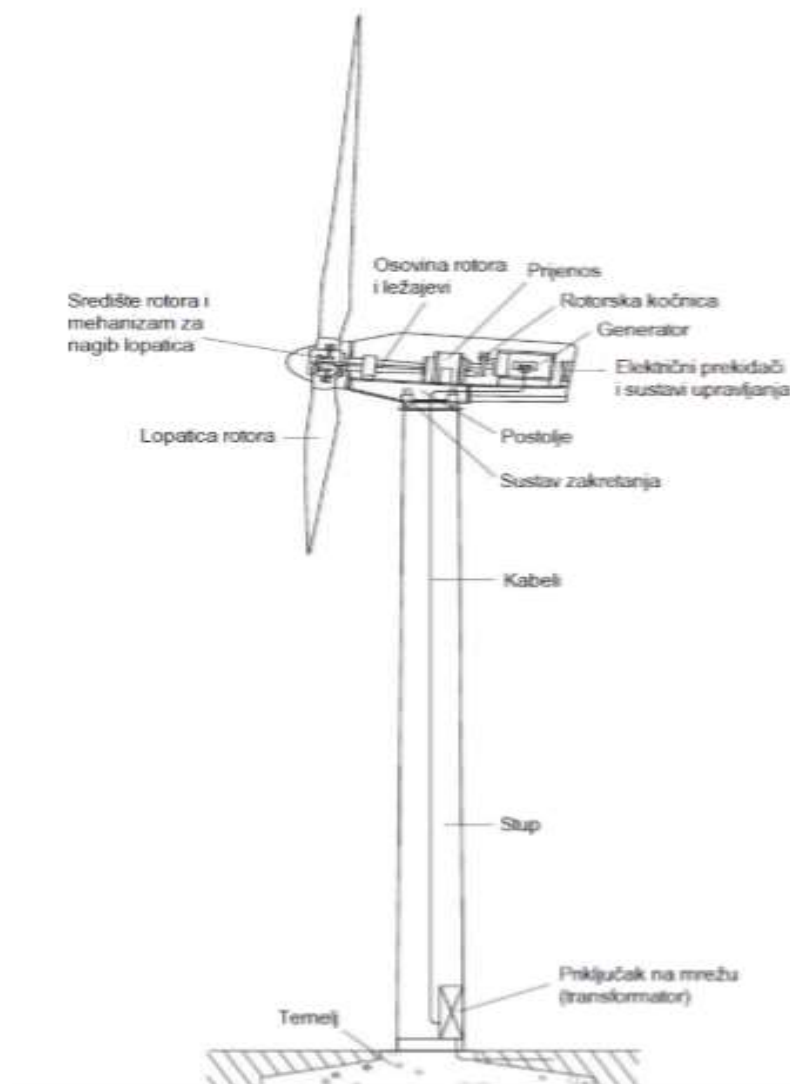


Slika 18. Shema vjetrogeneratora

Izvor: HRVATSKI CENTAR OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Osnovni dijelovi ovakve vjetroturbine su sljedeći [7]:

- rotor vjetroturbine
- vrtila s prijenosnikom
- električni generator
- regulacijski sustavi
- stup
- temelj



Slika 19. Glavni dijelovi vjetroatregata s horizontalnom osi vrtnje

Izvor: Mađar E. (2015.) ZAVRŠNI RAD

5.1 Rotor vjetroturbine

Rotor vjetroturbine sastavljen je od određenog broja lopatica, ovisno o izvedbi, spojenih na vratilo. Najefikasniji se pokazao model s tri lopatice, s brzinama vrtnje na vrhu lopatice od 50 do 70 m/s.

Rotor s tri lopatice pokazao se najboljim rješenjem u učinkovitosti, kao i u stabilnosti konstrukcije. Postoje i izvedbe s dvije i jednom lopaticom, no njihova efikasnost je manja i javlja se potreba za uravnoteženjem konstrukcije.

5.2 Vratilo s prijenosnikom

Funkcija vratila, kao i kod svakog drugog stroja, jest prijenos okretnog momenta. U slučaju vjetroturbine vratilo prenosi okretni moment od glavine do električnog generatora.

Postoje dvije vrste vratila koja mogu imati okomitu ili vodoravnu os. Kod takvih vratila zapravo se radi o dva vratila: sporohodnom i brzohodnom, povezanim prijenosnikom (multiplikatorom).

5.2.1 Sporohodno vratilo

Sporohodno vratilo spojeno je direktno na glavinu rotora i svrha mu je preuzimanje okretnog momenta, kao i radijalnog i aksijalnog opterećenja koje se dalje prenosi preko ležajeva na stup i temelj vjetroturbine. Brzina vrtnje je manja od 100 min^{-1} .

5.2.2 Brzohodno vratilo

Glavna funkcija brzohodnog vratila je pogon električnog generatora. U pravilu, on ne prenosi nikakvo opterećenje.

5.2.3 Prijenosnik (multiplikator)

Svrha prijenosnika je dovesti brzinu vrtnje rotora na brzinu vrtnje koju zahtijeva električni generator. Te brzine vrtnje su, najčešće, veće od 1500 min^{-1} . Prijenosnik je, najčešće, izveden kao zupčanik.

Potrebno je smanjiti vibracije i opterećenje na minimalnu mjeru. Česte su izvedbe prijenosnika sa spojkom koja služi za prekid prijenosa prema potrebi.

5.3 Električni generator

Električni generator služi za pretvaranje kinetičke energije brzohodnog vratila u električnu energiju. Takvi generatori imaju posebnu konstrukciju zbog čestih promjena okretnih momenata koji se događaju zbog promjene snage vjetra. U vjetroelektranama sa snagom većom od 150 kW najčešće se koriste generatori izmjeničnog napona.

5.4 Regulacijski sustavi

U regulacijske sustave spadaju sustavi koji upravljaju mehaničkim dijelovima vjetroturbine, a oni su sljedeći :

- sustav za zakretanje kućišta
- sustav za aerodinamičku regulaciju brzine vrtnje
- sustav mehaničkog kočenja
- nadzorno – upravljački i komunikacijski sustav

5.4.1 Sustav za zakretanje kućišta

Sustav za zakretanje kućišta kod vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje služi za usmjeravanje rotora prema smjeru vjetra radi što bolje iskorištenosti i napadnog kuta lopatica.

Ovaj sustav izvodi se pomoću hidrauličkog ili elektromotornog prijenosnika čiji je zupčanik u zahvatu s nazubljenim prstenom između stupa i kućišta vjetroturbine. Brzina djelovanja je oko 1°/s. Zaustavljanje kućišta obavlja se pomoću kočnica koje kućište zadržavaju u željenom položaju.

5.4.2 Sustav za aerodinamičku regulaciju brzine vrtnje

Ovaj sustav moguće je izvesti na dva načina:

- sa zakretanjem lopatica
- bez zakretanja lopatica

Kod sustava sa zakretanjem lopatica, lopatice ili samo njihovi vrhovi mogu se rotirati oko svoje osi ovisno o brzini vjetra. Kod velikih brzina vjetra, smanjuje se napadni kut, a samim time mijenjaju se i aerodinamičke sile koje djeluju na lopatice.

U drugom slučaju, regulacije bez zakretanja lopatica, lopatice su čvrsto vezane za glavinu. Kod većih brzina vjetra povećava se upadni kut, a posljedica je smanjivanje sile uzgona te povećavanje sile otpora koja smanjuje okretni moment i snagu.

Pozitivna strana ove regulacije je jednostavnost u izvedbi. Negativna strana je javljanje veće aerodinamičke sile na rotor te je potrebno obratiti više pozornosti kod projektiranja oblika lopatica.

5.4.3 Sustav mehaničkog kočenja

Svrha sustava mehaničkog kočenja jest smanjivanje brzine vrtnje rotora ili potpuno zaustavljanje rotora u slučaju vrlo jakog vjetra i sličnih situacija. Sistem mehaničkih kočnica sličan je kao kod prednjih kotača na automobilu, a sastoji se od dvije diskovne kočnice kojima se upravlja hidraulički. U pravilu, ove kočnice se postavljaju na oba vratila, brzohodno i sporohodno.

5.4.4 Nadzorno – upravljački i komunikacijski sustav

Sustav služi za nadzor i upravljanje svim drugim regulacijskim sustavima, kao i za povezivanje s vanjskim sustavima. Ovaj sustav prikuplja i obrađuje sve podatke potrebne za normalan rad turbine i cijelog postrojenja. Na osnovi obrađenih podataka te dobivenih rezultata, poduzimaju se odgovarajuće mjere za regulaciju sustava.

5.5 Stup

Osnovna zadaća stupa je preuzimanje svih opterećenja do kojih dolazi na lopaticama rotora i kod prijenosa okretnog momenta na vratilo, kao i odvođenje tih opterećenja prema temelju. Na vrhu stupa nalazi se rotor i kućište vjetroturbine.

Također, stup je bitan element vjetroturbine jer podiže rotor na optimalnu visinu koja je potrebna za neometanu vrtanju.

Stupovi vjetroelektrane najčešće se izrađuju od čelika, dok se rjeđe može vidjeti izvedba od armiranog betona. U pravilu je cjevaste izvedbe i unutar njega postavljene su električne instalacije čije se uvijanje nadzire elektroničkim putem.

Također, kako je već spomenuto ranije, na vrhu stupa nalazi se sustav za zakretanje kućišta. Stup je visine od 1,5 do 2 puta veći u odnosu na promjer lopatica kako bi turbina mogla hvatati vjetar veće brzine na većim visinama.

5.6 Temelj

Temelj vjetroturbine je njezin sastavni dio koji apsorbira opterećenja proizvedena od rotora. Temelj ima dvije osnovne zadaće:

- osiguravanje stabilnosti stupa
- održavanje određenih specifičnih pritisaka na tlo

Na stjenovitim podlogama površina temelja se smanjuje zbog specifične nosivosti stijena. Radi boljeg učvršćivanja konstrukcije koriste se čelična sidra koja se umeću u bušotine, a potom zalijevaju betonom radi što čvršće veze.

6. VRSTE VJETROELEKTRANA

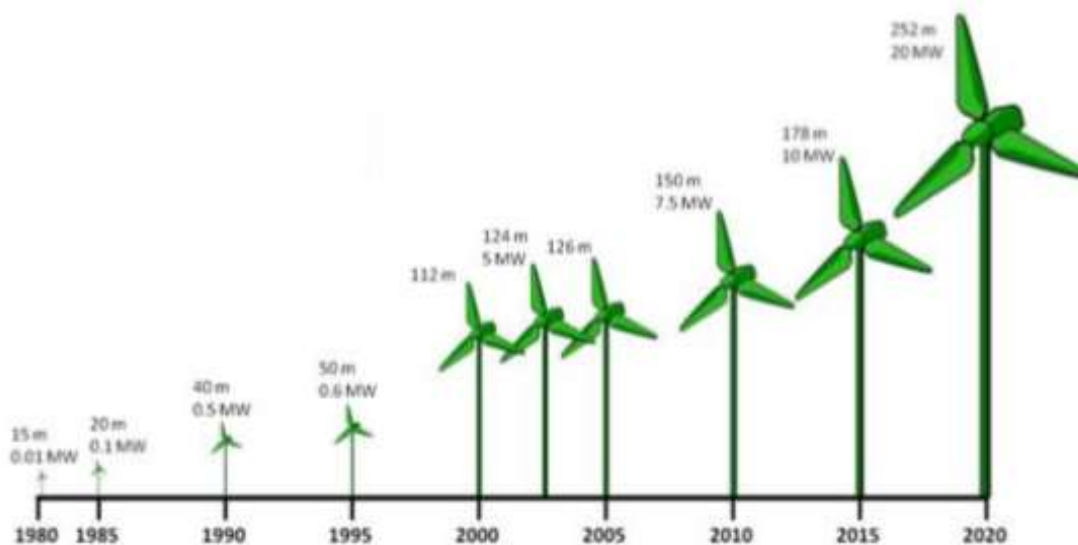
6.1 Vrste vjetroelektrana prema instaliranoj snazi

Obzirom na količinu električne energije koju proizvode, vjetroelektrane se mogu podijeliti na:

- male vjetroelektrane
- velike vjetroelektrane

6.1.1 Male vjetroelektrane

Malim vjetroelektranima nazivaju se vjetroelektrane koje imaju instaliranu snagu do nekoliko desetaka kW. Ove su vjetroelektrane, najčešće, izvedene od vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje, a postavljene su niz vjetar.



Slika 20. Povećanje dimenzija i snage vjetroatragnata od 1980. do 2020. godine

Izvor: Županić D. (2015). DIPLOMSKI RAD

Za pretvorbu kinetičke energije vjetra u električnu koriste se asinkroni generatori koji mogu biti istosmjerni ili izmjenični. Male se vjetroelektrane, najčešće, koriste kao autonomni izvori energije, kao dodatni izvori energije ili za pogon vodenih crpki i punjenje akumulatora na brodicama [6].

6.1.2 Velike vjetroelektrane

Velike vjetroelektrane nazivamo vjetroelektrane pojedinačne snage do 3,5 MW.

Glavna svrha im je proizvodnja električne energije za komercijalne potrebe. Velike vjetroelektrane nazivaju se još i vjetroparkovi.

Kod gradnje treba obratiti pažnju na raspored vjetrogeneratora. Oni se moraju postaviti dovoljno daleko jedan od drugog kako bi imali maksimalnu efikasnost. Promjer rotora kod ovakvih vjetrogeneratora iznosi od 39 do 150 metara [6].



Slika 21. Polje velikih vjetroelektrana

Izvor: HRVATSKI CENTAR OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

6.2 Vrste vjetroelektrana s obzirom na položaj

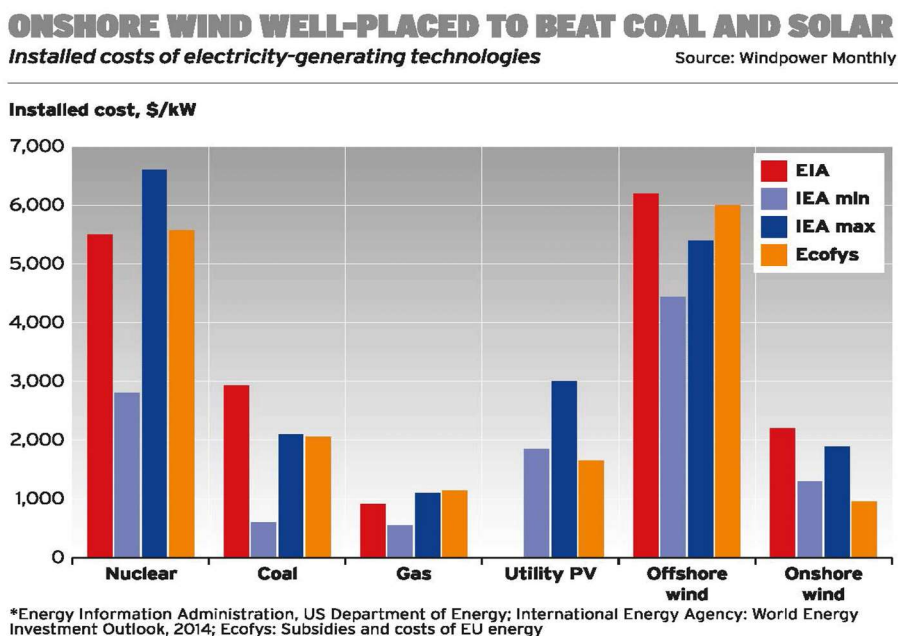
Prema položaju vjetroelektrane možemo podijeliti na:

- kopnene vjetroelektrane
- priobalne vjetroelektrane
- plutajuće vjetroelektrane
- zračne vjetroelektrane

6.2.1 Kopnene vjetroelektrane

Kopnene vjetroelektrane najčešći su oblik vjetroelektrana u svijetu. Cijena proizvodnje energije kopnenih vjetroelektrana je u padu što pridonosi većem ulaganju u ovu vrstu vjetroelektrana.

Najveća kopnena vjetroelektrana trenutno u svijetu je Gansu vjetropark koji se nalazi u Kini. Primarni cilj vjetroelektrane je postići instaliranu snagu od 20 000 MW do 2020. godine [6].



Slika 22. Usporedba troškova pojedinih izvora energije u kW

Izvor: Jerkić L. Kopnene vjetroelektrane nikad nisu bile konkurentnije

6.2.2 Priobalne vjetroelektrane

Priobalnom vjetroelektranom nazivaju se vjetroelektrane koje se grade u moru, s čvrstim temeljima, na dubinama manjim od 60 metara. Razlog za izradu vjetroelektrana na moru jest, prvenstveno, vjetropotencijal koji se javlja zbog manje hrapavosti površine mora od kopna. Porast brzine vjetra na moru raste linearno oko 0,5 m/s na 10 metara [9].

Izgradnja priobalnih vjetroelektrana je skuplja od kopnenih, ponajprije zbog stupova koji su puno viši nego na kopnu. Također, troškovi održavanja ovakvih postrojenja su skuplji. Trenutno najveća priobalna vjetroelektrana je *London Arrey*, instalirane snage od 630 MW [9].

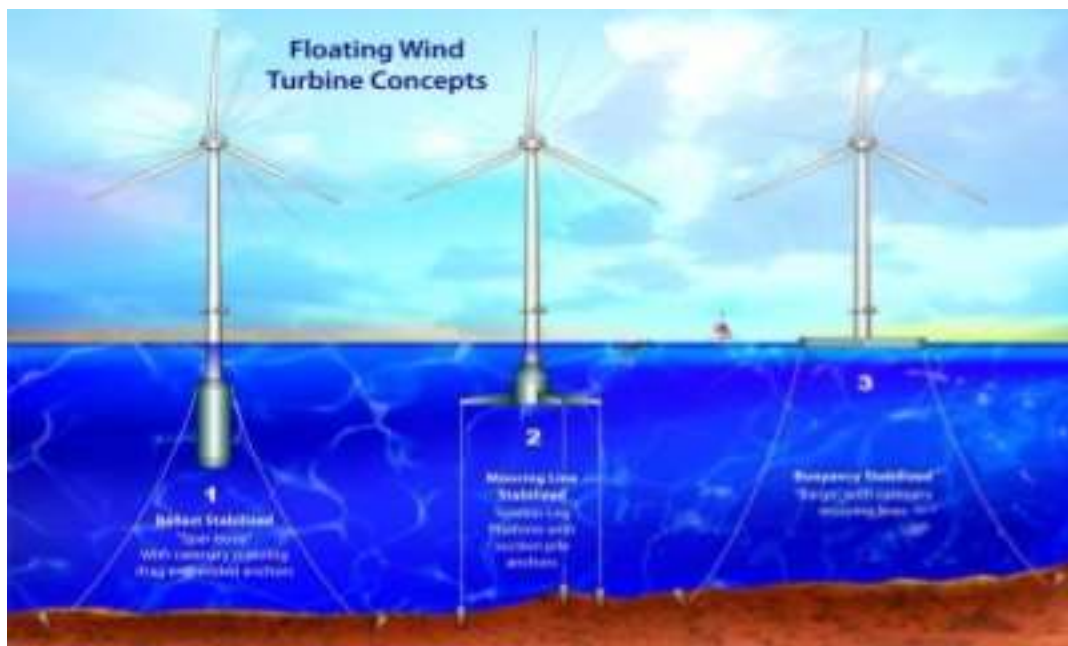


Slika 23. Priobalna vjetroelektrana

Izvor: Županić D. (2015). DIPLOMSKI RAD

6.2.3 Plutajuće vjetroelektrane

Plutajuće elektrane grade se na otvorenom moru, pučini. Postavljaju se na plutajuću strukturu u dubljem moru. Plutajuće vjetroelektrane povezuju se zajedno radi lakšeg prijenosa električne energije. Konstrukcijski su složene i iziskuju veće početne troškove [6].



Slika 24. *Plutajuća vjetroelektrana*

Izvor: Županić D. (2015). DIPLOMSKI RAD

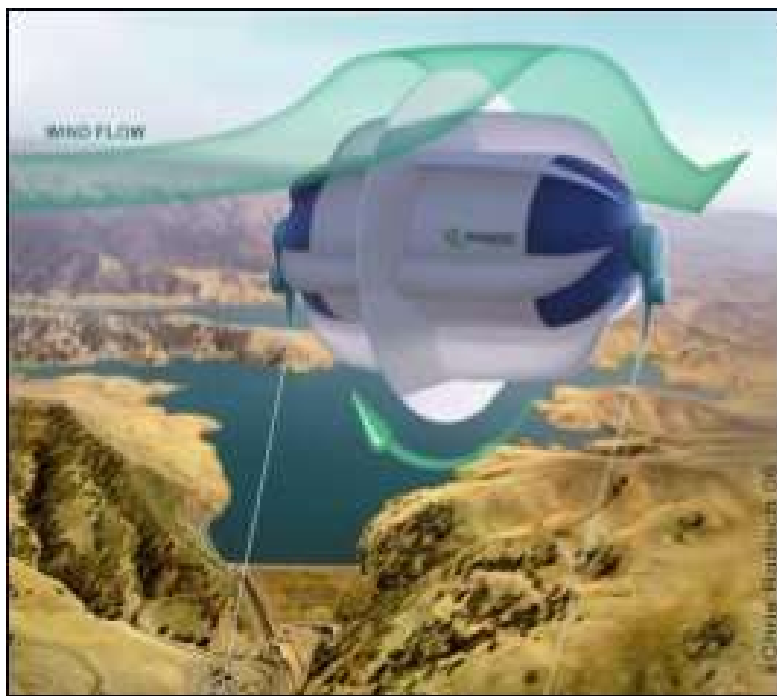
6.2.4 Zračne vjetroelektrane

Koncept zračnih vjetroelektrana zasniva se na iskorištavanju potencijala vjetra u višim slojevima atmosfere. Moguće ih je podijeliti u dvije skupine:

- zračne vjetroelektrane za iskorištavanje vjetra na nižim visinama
- zračne vjetroelektrane za iskorištavanje vjetra na višim visinama

Važno je napomenuti kako su zračne vjetroelektrane u potpunosti ekološki prihvatljive. Procjenjuje se da bi one mogle proizvoditi električnu energiju 90 % vremena što bi znatno smanjilo cijenu električne energije.

U posljednjih dvadeset godina razvijeno je mnogo koncepata za ovu vrstu vjetroelektrana. Predviđene su za iskorištavanje vjetra na višim visinama te ih je moguće postaviti na bilo koju lokaciju u svijetu [6].



Slika 25. Zračna vjetroelektrana

Izvor: Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD

7. NUMERIČKI PRIMJER PRORAČUNA VJETROTURBINE

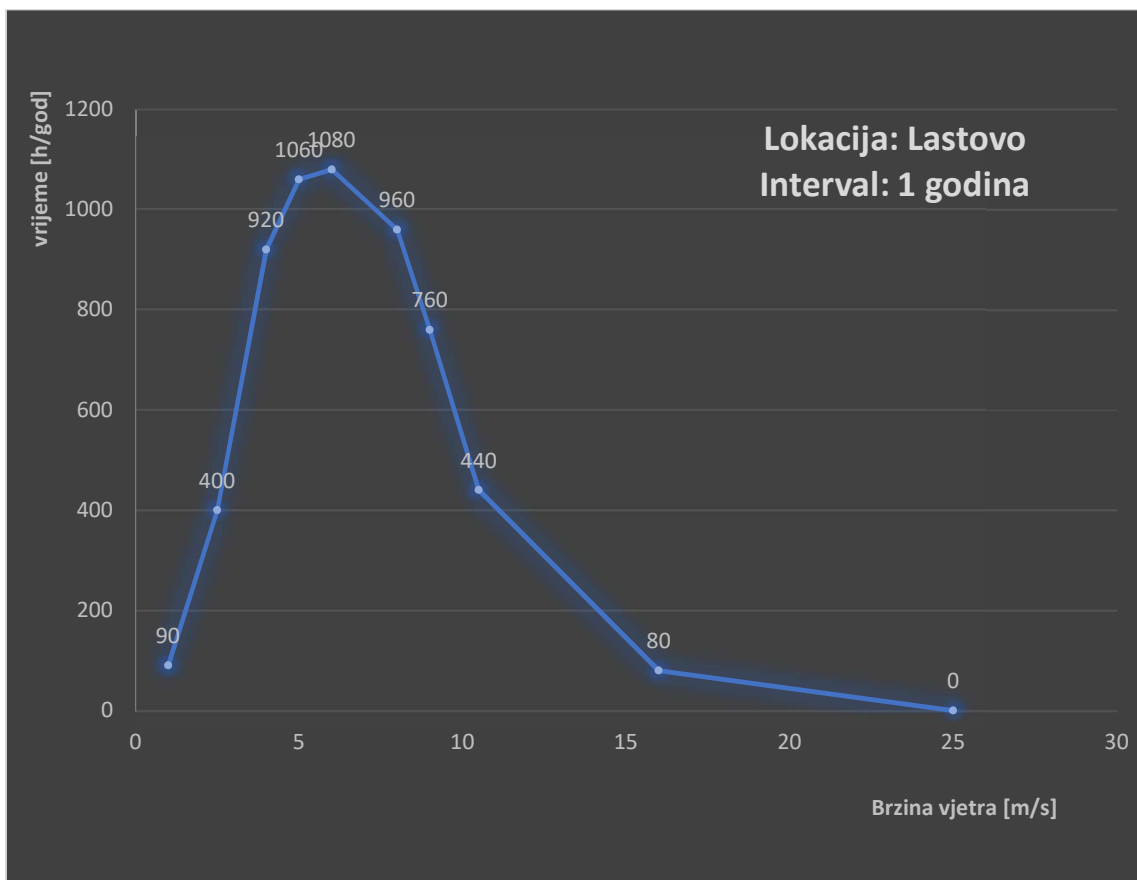
U sljedećem primjeru bit će opisane glavne dimenzije i značajke rada vjetroturbine snage 100 kW kod maksimalnog stupnja iskorištenja vjetroturbine c_{pmax} za rad na zadanoj lokaciji [9].

Važno je naglasiti da se radi o konstrukcijskom rješenju pojednostavljenog modela vjetroturbine, sa aerodinamičkim obilježjima energetske vjetroturbine.

Za programiranje dimenzija lopatica i značajki modelne turbine zadani su ulazni podaci ovog primjera:

Broj lopatica	$B = 3$
Specifična gustoća zraka	$\rho = 1,292 \text{ kg/m}^3$
Približna vrijednost maksimalnog stupnja učinkovitosti	$c_p = 0,5$
Vršni koeficijent brzohodnosti	$k_p = 6$
Srednja energetska brzina vjetra	$v_s = 9,3 \text{ m/s}$
Interval radnih brzina turbine	$v_u - v_i = 4 - 20 \text{ m/s}$
Snaga vjetroturbine	$P = 100 \text{ kW}$
Lokacija :	Lastovo

Izračun srednje energetske brzine vjetra vidi se iz dijagrama učestalosti trajanja brzina vjetrova za zadanu lokaciju, prikazanog na slici 22.



Graf 1. Učestalost trajanja brzine vjetra za zadanu lokaciju

Izvor: Pilić – Rabadan Lj. (1999). VODNE TURBINE I PUMPE, VJETROTURBINE

Iz formule za stupanj aerodinamičke pretvorbe može se izvesti formula za površinu rotora vjetroturbine:

$$c_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v_s^3 A} \Rightarrow A = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v_s^3 c_p}$$

$$A = \frac{100000 \text{ W}}{\frac{1}{2} * 1,292 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,33 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,5} = 384,9 \text{ m}^2$$

Pomoću formule za izračunavanje površine kruga može se izraziti polumjer lopatice vjetroturbine:

$$A = R^2\pi \Rightarrow R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$R = \sqrt{\frac{384,9}{\pi}} = 11,06 \text{ m} \quad R_{usv} = 11 \text{ m}$$

Iz polumjera turbine može se usvojiti promjer $D_{usv} = 22 \text{ m}$



Slika 26. *Model vjetroturbine*

Izvor: Slika autora



Slika 27. *Model vjetroturbine*

Izvor: Slika autora

Budući da znamo vrijednost vršnog koeficijenta brzohodnosti k_p te iz tog izraza možemo izlučiti izraz za kutnu brzinu koji glasi:

$$k_p = \frac{R * \omega}{v_s} \Rightarrow \omega = \frac{k_p * v_s}{R}$$

$$\omega = \frac{6 * 9,3}{11} = 5 \frac{rad}{s}$$

Nakon što je određena kutna brzina mogu se izračunati okretaji rotora vjetroturbine u jedinici vremena.

$$n = \frac{\omega}{\pi} * 60$$

$$n = \frac{5}{\pi} * 60 = 97 \frac{okretaja}{min}$$

8. PREDNOSTI I NEDOSTATCI VJETROELEKTRANA

8.1 Prednosti vjetroelektrana

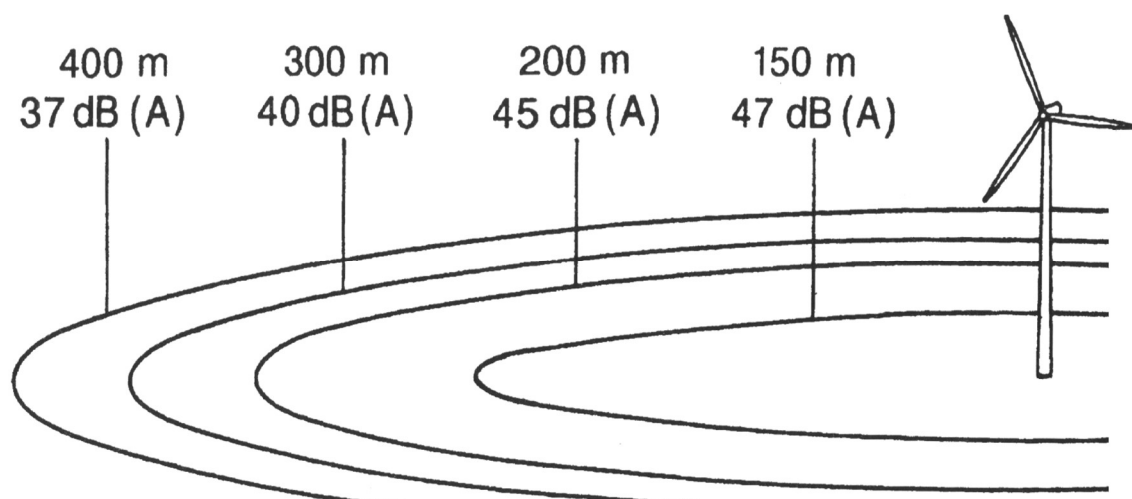
Mnogobrojne su prednosti vjetroelektrana. One su jedan od najpoželjnijih obnovljivih oblika energije. Budući da su pogonjene snagom vjetra, nema potrošnje fosilnih goriva osim kod izrade dijelova koji se moraju obrađivati kako bi mogli izdržati potrebna naprezanja i vibracije. Stoga države koje se odluče ulagati u ovu vrstu energije smanjuju potrošnju uvoza fosilnih goriva.

Jedna od prednosti vjetroelektrana je njihova mogućnost postavljanja na različite terene. Mogu se postavljati na moru, obali i na nekim nepristupačnim terenima, a zemljišta oko njih mogu služiti za uzgoj poljoprivrednih kultura ili ispašu stoke.

8.2 Nedostatci vjetroelektrana

Jedan od glavnih nedostataka jest efikasnost vjetroelektrana. Efikasnost im ovisi o meteorološkim uvjetima na nekom području te snazi i brzini vjetra. Troškovi izrade sustava vjetroelektrana veoma su visoki zbog posebnih materijala koji se koriste tijekom izrade, a također, visoki su i troškovi održavanja takvih složenih sustava.

Ujedno, vjetrogeneratori stvaraju veliku razinu buke koju proizvodi vrtnja lopatica koje presijecaju strujnice zraka. Ovaj problem danas se rješava sve boljim sustavima zvučne izolacije.



Slika 28. Intenzitet zvuka vjetroturbine s obzirom na udaljenost

Izvor: Klarin B. UTJECAJ NA OKOLIŠ VJETROTURBINE KAO IZVORA ZVUKA

9. ZAKLJUČAK

Ovaj rad potaknut je globalnom potrebom za iskorištavanjem obnovljivih izvora energije. Vjetroenergetski potencijal, kako u Hrvatskoj, tako i u svijetu, još uvijek nije dovoljno iskorišten. Unatoč tome, bilježi se porast broja vjetroelektrana. Razvojem tehnologije razvijaju se i nova konstrukcijska rješenja koja bi u budućnosti mogla biti implementirana.

Što se tiče samih vjetrogeneratora, njihov proračun je kompleksan, ponajprije zbog nepredvidivog ponašanja i gibanja vjetra. Kod proračuna vjetroturbina potrebna su znanja iz tehničkih područja mehanike, čvrstoće, mehanike fluida, termodinamike i ostalih povezanih područja. Konstrukcijskih rješenja za vjetrogeneratore ima mnogo. Svako od rješenja ima svojih prednosti, ali i nedostataka. Raznovrstnost konstrukcijskih rješenja bitna je kako bi dobili maksimalnu iskoristivost vjetra kao izvora energije na određenoj lokaciji.

Vjetrogeneratori sa svojim prednostima predstavljaju velik potencijal za iskorištavanje i pretvorbu energije vjetra u električnu energiju. U današnje vrijeme energija vjetra je izvor energije s najvećim prirastom. Energija vjetra velik je izvor energije, a potrebno je samo prepoznati njezin potencijal i pravilno ga iskoristiti.

10. LITERATURA

- [1] Labudović B. (2002). OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE; Zagreb, Energetika marketing.
- [2] Vinković I. (2009). DIPLOMSKI RAD; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
http://repozitorij.fsb.hr/592/1/25_03_2009_Diplomski_rad_-_Inge_Vinkovic.pdf
(1.9. 2017)
- [3] Martin O., Hansen L. (2008). Aerodynamics of wind turbines; Drugo izdanje; London; Earthscan
- [4] Šljivac D. (2008). „OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE: Energija vjetra“, Osijek
- [5] Mađar E. (2015.) ZAVRŠNI RAD; Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
http://old.riteh.hr/nast/obrane/strucni_el/Radovi_072015/0069056983108_Madjar%20Edi.pdf (1.9. 2017)
- [6] Županić D. (2015). DIPLOMSKI RAD; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
http://repozitorij.fsb.hr/4887/1/DIPLOMSKI%20RAD_Doris%20%C5%BDupani%C4%87.pdf (1.9. 2017)
- [7] HRVATSKI CENTAR OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE;
<https://solarserdar.wordpress.com/2011/02/28/hcoie-osnove-energije-vjetra/>
(1.9. 2017).
- [8] Jerkić L. Kopnene vjetroelektrane nikad nisu bile konkurentnije;
<http://www.vjetroelektrane.com/aktualno/2210-kopnene-vjetroelektrane-nikad-nisu-bili-konkurentnije> (1.9. 2017.)
- [9] Pilić – Rabadan Lj. (1999). VODNE TURBINE I PUMPE, VJETROTURBINE; Split; Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

- [10] Klarin B. UTJECAJ NA OKOLIŠ VJETROTURBINE KAO IZVORA ZVUKA;
http://marjan.fesb.hr/~bklarin/Rad003/Utjecaj_na_okolis_vjetroturbine_CLANA_K.html (10.3. 2018.)

Prilozi

Popis slika

Slika 1. <i>Beaufortova ljestvica jačine vjetra</i>	10
Slika 2. <i>Ruža vjetрова</i>	11
Slika 3. <i>Promjena brzine vjetra s visinom</i>	12
Slika 4. <i>Betzov limit</i>	14
Slika 5. <i>Ovisnost snage vjetra o brzini vjetra</i>	15
Slika 6. <i>Primjena sile uzgona kao pogonske sile</i>	17
Slika 7. <i>Dobivanje rotacijskog gibanja na principu sile uzgona</i>	17
Slika 8. <i>Primjena sile otpora kao pogonske sile</i>	18
Slika 9. <i>Konstruktivska rješenja vjetroturbina s obzirom na položaj vratila</i>	19
Slika 10. <i>Izvedba vjetroturbine s lopaticama iza stupa</i>	20
Slika 11. <i>Izvedba vjetroturbine s lopaticama ispred stupa</i>	21
Slika 12. <i>Darrieusova vjetroturbina</i>	22
Slika 13. <i>H-tip vjetroturbine</i>	23
Slika 14. <i>Darrieusova spiralna vjetroturbina</i>	24
Slika 15. <i>Horizontalni tip Darrieusove vjetroturbine</i>	25
Slika 16. <i>Savoniusova vjetroturbina</i>	26
Slika 17. <i>Vjetroturbine s jednom, dvije i više lopatica</i>	28
Slika 18. <i>Shema vjetrogeneratora</i>	29
Slika 19. <i>Glavni dijelovi vjetroatagregata s horizontalnom osi vrtnje</i>	30
Slika 20. <i>Povećanje dimenzija i snage vjetroatagregata od 1980. do 2020. godine</i>	35
Slika 21. <i>Polje velikih vjetroelektrana</i>	36
Slika 22. <i>Usporedba troškova pojedinih izvora energije u kW</i>	37

Slika 23. <i>Priobalna vjetroelektrana</i>	38
Slika 24. <i>Plutajuća vjetroelektrana</i>	39
Slika 25. <i>Zračna vjetroelektrana</i>	40
Slika 26. <i>Model vjetroturbine</i>	43
Slika 27. <i>Model vjetroturbine</i>	44
Slika 28. <i>Intenzitet zvuka vjetroturbine s obzirom na udaljenost</i>	46

Popis grafova

Graf 1. <i>Učestalost trajanja brzine vjetra za zadanu lokaciju</i>	42
--	----

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	površina
a	-	koeficijent indukcije
α	$^\circ$	kut udara vjetra
B	-	broj lopatica
c_p	-	stupanj aerodinamičke pretvorbe
$c_{p, max}$	-	Betzova granica
D_{usv}	m	promjer
H	m	visina glavine
k_P	-	vršni koeficijent brzohodnosti
\dot{m}	kg/s	maseni protok
n	min^{-1}	brzina vrtnje
O	N	sila otpora
P	W/kW	snaga turbine
P_{rasp}	W/kW	raspoloživa snaga vjetra
P_{vj}	W/kW	snaga vjetra
R	m	polumjer lopatice turbine
R_{usv}	m	usvojeni polumjer lopatice turbine
T	K	temperatura
t	s/h	vrijeme
u	m/s	aksijalna brzina u ravnini rotora
U	N	sila uzgona
u_1	m/s	brzina u brazdi
v	m/s	brzina strujanja
v_s	m/s	srednja energetska brzina vjetra
v_u-v_i	m/s	interval radnih brzina turbine
W	J	maksimalna energija vjetroagregata
ω	rad/s	kutna brzina

ρ	kg/m^3	gustoća zraka
σ	-	punoća lopatice
λ	-	koeficijent vršne brzine

Prilog A